基于 DRS4 评估板的正电子湮没高效测量方法研究

何子睿 [1,2] 况鹏 [2,3] 于啸天 [2,3] 张红强 [2,3] 王英杰 [2,3] 张鹏 [2,3] 刘福雁 [2,3] 王宝义 [2,3]

单健 [1] 曹兴忠 [2,3]

1（南华大学 电气工程学院 衡阳 421001）

2（中国科学院高能物理研究所 多学科研究中心 北京 100049）

3（河南省科学院高能物理研究中心 郑州 450046）

摘要 基于开关电容矩阵的 DRS4 芯片的高性能数字化波形采样器件，凭借其高采样率、高集成度、低功耗的特点，成为大规模、多通道时间测量系统的优先选择，在多路正电子湮没寿命探测中也展现出潜在的应用前景。本文针对基于 DRS4 评估板的双探测器通道的正电子湮没寿命测量系统数据处理效率低下的主要原因，采用符合判选的方法，通过精确甄别采样电路中的有效事例，确保电路中核心资源高效利用，以实现基于 DRS4 评估板的高效率正电子湮没测量。经测量，符合判选方法下基于 DRS4 评估板的正电子湮没寿命测量系统的符合计数率可达到 DRS4 评估板的处理极限。

关键字 正电子湮没；DRS4；符合判选；符合计数率

Research on efficient measurement methods for positron annihilation based on the DRS4 evaluation board

HE Zirui[1,2] KUANG Peng[2,3] YU Xiaotian[2,3] ZHANG Hongqiang[2,3] WANG Yingjie[2,3] ZHANG Peng[2,3]

LIU Fuyan[2,3] WANG Baoyi[2,3] SHAN Jian[1] CAO Xingzhong[2,3]

国家自然科学基金（No.12105305、No.12175261）资助

第一作者：何子睿，男，1999 年出生，2021 年毕业于湖南城市学院，现为硕士研究生，研究领域为正电子湮没谱学技术.

通讯作者：刘福雁，邮箱：liufy@ihep.ac.cn;单健，邮箱：shanjian0666@163.com.

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.12105305、No.12175261)

First author: He Zirui, male, born in 1999, graduated from Hunan City University in 2021, master student. His research field is positron annihilation spectroscopy.

Corresponding author: LIU Fuyan, E-mail: liufy@ihep.ac.cn; SHAN Jian, E-mail: Shanj0666@163.com

1(*School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China*)

2(*Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

3(*Center for High Energy Physics, Henan Academy of Sciences, Henan 450046, China*)

Abstract **[Background]**: The high performance digital waveform sampling device based on the switched capacitor matrix DRS4 chip, with its high sampling rate, high integration and low power consumption, has become the preferred choice for large-scale, multi-channel time measurement systems, and has shown potential application prospects in multi-channel positron annihilation lifetime detection. **[Purpose]**: This paper constructs a positron annihilation measurement system with dual detector channels based on the DRS4 evaluation board, systematically analyzes the main factors leading to its low data processing efficiency through experimental studies, and implements improvements to the measurement system. **[Methods]**: In response to the system's low data processing efficiency, an effective event pre-coincidence selection method was adopted in the experiment. By precisely filtering the valid events in the DRS4 acquisition circuit, the method ensures the efficient utilization of the core signal processing resources within the circuit. **[Results]**: Measurement results show that the DRS4 positron annihilation lifetime measurement system based on the new triggering method can reach the processing limit of the DRS4 evaluation board, with a coincidence counting rate of 376 cps (Counts Per Second). **[Conclusion]**: By employing the method of valid event coincidence selection, the performance of the positron annihilation lifetime measurement system based on the DRS4 evaluation board has been improved, providing a solution for the triggering logic selection in multi-channel positron annihilation lifetime measurement systems.

Key words Positron annihilation; DRS4; Coincidence selection; Coincidence count rate

引言：

正电子湮没寿命测量技术是研究材料内部微观结构的一种无损表征方法，可甄别缺陷的类型、尺寸以及相对浓度等特征信息[1,2]。正电子寿命测量作为最典型的核物理时间测量方法，其最为关键的两个性能参数是符合计数率和时间分辨率，决定了谱仪的探测效率和检测精度[3]。传统正电子湮没寿命谱仪发展较为成熟，通常由闪烁体探测器和恒比定时甄别器、时幅转换器、多道分析仪等标准模块化核电子学系统组成，其时间分辨和探测效率较为固化，分别为 200 ps 和 300 cps[4]。近年来，随着数字化采样和处理技术的发展，采用造价和功耗更低的数字化电子学构建正电子寿命谱仪已经成为发展趋势，同样可在时间分辨等性能参数上比拟模拟电子学系统[5,6,7]。尤其是在通道数规模较大的新型正电子湮没测量实验中，具有高集成度特性的数字化电子学能够发挥出更高的应用潜力，如，高亮度正电子束团探测[8]。

基于 SCA 波形采样的 DRS4 芯片是近年来由 PSI 公司开发的高性能数字化采样器件，其采样率最高可达 5 GS/s、模拟输入带宽达 950 MHz，凭借其采样率高、成本低和输入通道集成灵活的优势，该芯片在正电子湮没寿命谱学实验中也得到了广泛的应用[9]。例如，中国科学技术大学搭建了基于 DRS4 评估板的正电子湮没寿命测量系统，在优化数字化波形处理和定时分析方法后，系统时间分辨率达到了 206 ps，可满足正电子湮没测量的基本要求[10]；斯洛伐克理工大学基于 DRS4 评估板开发了正电子湮没寿命测量软件 QtPALS，并在双通道和三重符合两种正电子湮没寿命测量场景中成功应用[11,12]；德国维尔茨堡大学基于 DRS4 评估板开发了正电子湮没寿命谱数据采集与模拟软件 DDRS4PALS，通过研究数字化脉冲校正、滤波等技术提高了时间测量精度和寿命谱信噪比，并且已在材料中缺陷和非晶态结构研究中应用[13]。

尽管基于 DRS4 芯片的数字化寿命谱仪已实现了较高的时间分辨，但这些系统的探测效率均较低，在同等探测条件下仍未达到常规模拟电子学谱仪系统的水平。在前期实验中，通过将正电子湮没测量中的起始、停止两路探测器信号直接馈入 DRS4 评估板中搭建了正电子寿命测量系统，实验结果显示，对于 14.4 μCi 的正电子源，该系统符合计数率最高仅为 55 cps (Counts Per Second)，远低于同等条件下传统正电子湮没寿命谱仪的计数率（~300 cps）。中国科学技术大学的研发团队搭建的 DRS4 评估板正电子寿命测量系统也得到了类似的结果，符合计数率不随源强增强而增大，其最大符合计数率为 75 cps[10]。直接将数字化波形采样技术应用在正电子湮没测量，会存在测量效率低的问题。这主要是由于无效事例触发采样导致的。一方面，在采样过程中，无效事例占用采样时间，导致系统在处理这些无效事例期间无法对有效事例进行采样；另一方面，在对核信号处理过程中，无效事例占比大且受处理能力的限制，会导致单位时间内采集到的有效事例数少，这直接影响了系统对有效事例捕获效率。国际上一些研究团队也关注到了数字化波形采样技术在正电子湮没测量中效率低下的问题，并提出了相应的解决方案。针对测量效率的提升，国际上主要采用的预判选的方法来实现。例如，斯洛伐克理工大学的研发团队搭建了预判选方式下基于 DRS4 评估板的正电子湮没寿命测量系统[11]。该系统，采用了预判选方法，当系统检测到两路信号的能量均超过设定能量阈值时，触发 DRS4 芯片进行采样。在预设选择方式下，测量系统的测量效率有所提高。在源强为 27 μCi 条件下，符合计数率可达到 200 cps。当前系统采用的预判选方法仅对信号进行粗略筛选，仍存在无效事例触发 DRS4 采样，导致该系统测量效率未能达到最优。尽管 DRS4 芯片的触发方式已有所改进，但是尚未系统研究最合理的信号筛选方案，使测量系统的效率达到极限。

针对这些问题，本文通过研究对 DRS4 芯片的触发方案，系统研究了 DRS4 芯片的有效触发与符合时间信号的关系，实现了基于 DRS4 评估板的高效率正电子湮没测量。

1 实验方法

本文搭建了基于 DRS4 的正电子测量系统，系统由两个 BaF_2 探测器（BaF_2 晶体尺寸为 Φ30 mm ×20 mm，光电倍增管型号为 Hamamatsu R3377）、高压电源、DRS4 评估版（DRS4 Evaluation Board）和一台上位机组成。探测器 A 和 B 的阳极信号分别馈入 DRS4 评估板的 Ch1 和 Ch2 通道，两路信号经过 DRS4 评估板处理，转化为一系列二进制数据经数据线传输至上位机。在上位机软件中，两探测器信号经过算法重建和幅值分析，确定起始信号(1.28 MeV γ光子)与停止信号（0.511 MeV 的 γ光子）后进行恒比定时和信号间时间差计算，最后收集、统计足够时间差数据后得到所测样品的正电子湮没寿命谱。

由于 DRS4 评估板的触发逻辑设计的限制，会导致采样过程中频繁发生无效事例触发采样，采集大量无效数据。为保证核心信号高效传输，本文在信号馈入 DRS4 评估板前设置了符合判选电路，通过精确筛选 DRS4 评估板采集电路中的有效事例，确保电路中核心信号处理资源的高效利用，如下图 1 所示。符合判选电路由恒比定时甄别器（CFDD）和符合单元（Coincidence Unit）构成。模拟模块恒比定时甄别器（CFDD）分别甄别停止信号和起始信号。恒比定时鉴别器对落在正确能窗上的起始或停止信号进行甄别产生两个信号。两信号处于 100 ns 的符合窗内，符合单元会产生一个触发信号，一旦 DRS4 评估板接收到触发信号，DRS4 评估板开始对阳极信号进行采样。

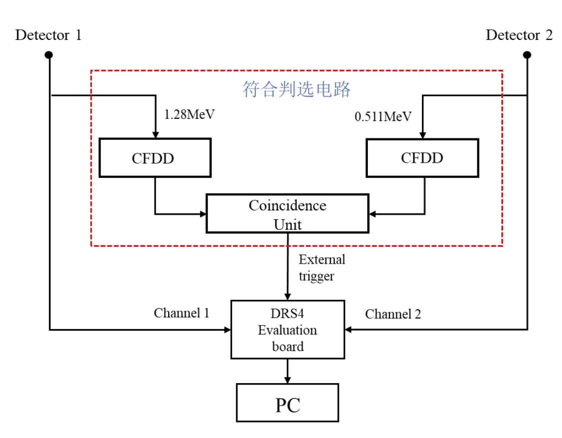


图 1 基于符合判选的 DRS4 评估板的正电子寿命测量系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of the time measurement system based on coincidence selection for the DRS4 evaluation board

为了简化采样电路，对 DRS4 评估版内部 FPGA 程序进行改进，通过在板卡内部实现符合判选，来代替外部符合判选电路。原理图如图 2 所示。对 DRS4 评估板 FPGA 内部程序进行修改，利用 DRS4 评估板中的甄别电路对起始信号或停止信号进行甄别，对两路同时

超出起始信号触发阈值的和超出停止信号触发阈值的信号进行触发采样。

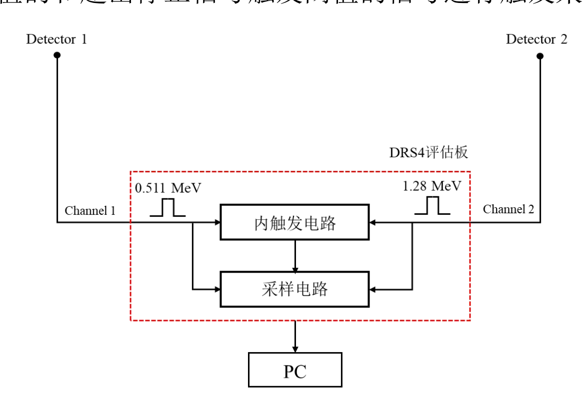


图 2 内部触发下基于 DRS4 评估板的正电子湮没寿命测量系统原理图

Fig.2 Schematic diagram of the positron annihilation lifetime measurement system based on the DRS4 evaluation board under internal triggering

本文从 DRS4 评估板触发方式这一因素来研究基于 DRS4 评估板的正电子湮没寿命测量系统计数率低的原因，并从外部触发电路和内部触发程序进行改进，搭建了符合判选方式下基于 DRS4 评估板的正电子湮没寿命测量系统，通过精确筛选 DRS4 采样电路中的有效事例，实现基于 DRS4 评估板的高效率正电子湮没测量。

2 结果与讨论

2.1 DRS4 评估板传输速度评估

实验采用信号发生器产生两个具有一定延迟的脉冲信号对测量系统进行评估。DRS4 评估板采集信号过程是由采样和读出数字化两个阶段依次对信号进行采样和处理。DRS4 停止采样并读出采样单元至 ADC 进行数字化的这段时间，称为死时间。在此期间，下一个信号无法触发 DRS4 采样，会导致信号丢失，使得信号发生器产生的信号频率与系统测得的计数率不一致。从图 3 可知，当信号频率在 2 Hz~500 Hz 时，信号能够有效触发 DRS4 进行采样，使得信号频率和系统计数率线性相关。随着信号频率从 500 Hz 增加至 5000 Hz 时，由于部分信号会在死时间内无法触发 DRS4 进行采样和 DRS4 评估板处理信号能力的原因，导致系统计数率与信号频率呈现非线性，其系统计数率在 510 cps 达到饱和，这与文献中提及的 DRS4 评估版因 USB 2.0 数据传输的限制而造成的最大测量速度限制一致[9]。结果表明：系统计数率受限于 DRS4 评估板处理信号能力，其系统计数率最高能达到 510 cps。

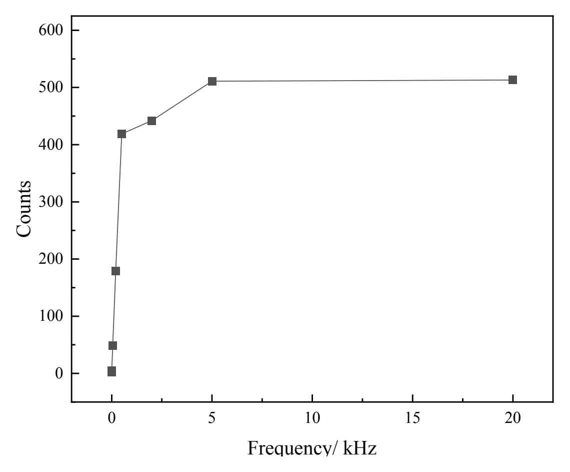


图 3 输入不同频率信号下正电子湮没寿命测量系统的计数率

Fig.3 Count rate of the time measurement system for signals of different frequencies

2.2 符合判选方式下基于 DRS4 的正电子湮没寿命测量系统效率评估

实验采用一对标准纯铁样品（Fe）与 ^{22}Na 源构成“三明治”结构放置在两个探测器之间，通过测量单位时间正电子湮没事件数作为系统的符合计数率，评估符合判选方式对信号时间测量系统的处理性能的作用，原理图如图 1 所示。图 4 为符合判选影响规律测量结果。可以看出，无符合判选的系统在 ^{22}Na 放射源源强增大至 5.21 μCi 后，其系统符合计数率达到极限，稳定在 50 cps 左右。基于符合判选的系统的符合计数率随放射源强度的增强而明显增加，在源强为 24 μCi 时，符合计数率最大可达 376 cps。同时可看出，受符合判选的影响，系统的符合计数率随着源强的增长，差距愈发明显。图 5 为同一源强下添加符合判选之后的增长比例（其中点为有无符合判选增长比例，虚线为增长趋势）。由图 5 可知，源强由 0.41 μCi 增长到 10.9 μCi 时，添加符合判选之后的系统符合计数率增长比例迅速增加，最终在源强增加至 10.9 μCi 后，比例稳定在 7.5 倍左右。

未采用符合判选的系统在采样过程中会有无效事例触发 DRS4 评估板进行采样，采集的数据中包含大量无效事件。在上位机对有效事件进行筛选后，仅能保留少量有效事例。所以，未使用符合判选的系统符合计数率，受无效事例误触发的影响，会随源强的增大而上升，在源强为 5.21 μCi 时达到最大，之后便趋于稳定。对于采用符合判选方式的系统来说，通过精准甄别有效事例再触发采样，能够有效避免无效事例的采集，提高 DRS4 评估板的对有效事例的处理性能，实现系统高效率采集。由于 DRS4 评估板的数据传输电路设计的限制，这限制了数据传输的速度，使得采集的数据量仅能到达一定的水平，而无法实现更高的数据传输速率。核信号与信号发生器产生的信号不同，具有随机性，即产生的时间间隔不均匀。由于核信号的随机性，基于符合判选的系统单位时间内采集到的核信号数量会低于评估板传输极限。在源强为 24 μCi 时，基于符合判选的系统对核信号的处理性能达到最大，其符合计数

率为 376 cps。结果表明：采用符合判选方式精确筛选 DRS4 评估板采集电路中的有效事例，可以有效保障电路中核心信号处理资源的高效利用，实现基于 DRS4 评估板的正电子湮没高效率测量。

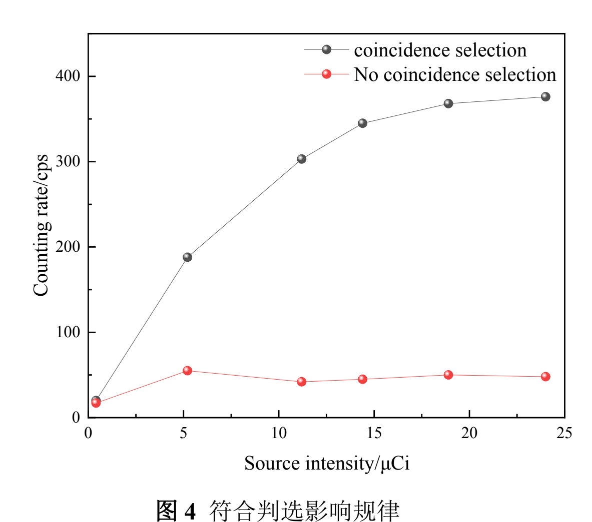


图 4 符合判选影响规律

Fig.4 The impact regularity of coincidence selection criteria

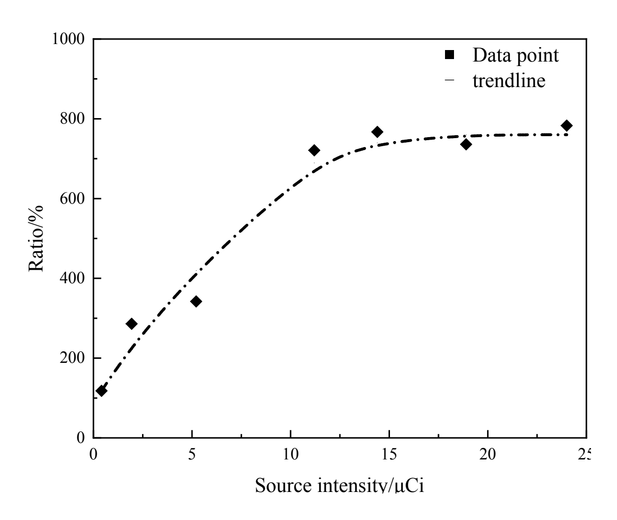


图 5 同一源强下添加符合判选之后的增长比例

Fig.5 Growth ratio based on coincidence selection using the same source

为了提高系统测量效率，减小 DRS4 评估板死时间和数据传输方式是提升评估板性能的重要途径。可以将 DRS4 采用并行读出的方式取代串行读出的方式，从而减小评估板死时间的影响，来实现系统测量效率的提升。系统采用 USB 2.0 接口与上位机进行数据交互，USB 2.0 的传输速率不足。可以采用以太网的方式取代 USB 2.0 实现数据传输，能够提高数据传输速度，实现系统测量效率的提升。不考虑板卡传输极限，可以尝试更高的源强实现更高的测量效率。

2.3 内触发下基于 DRS4 的正电子湮没寿命测量系统效率评估

为了研究内触发在基于 DRS4 的正电子湮没寿命测量系统的可行性，实验同样采用一对

标准纯铁（Fe）样品与 ^{22}Na 源构成“三明治”结构放置在两个探测器之间，通过测量单位时间正电子湮没事件数作为系统的符合计数率，评估内触发对基于 DRS4 评估板的正电子湮没寿命测量系统的处理性能的作用，并利用 ^{60}Co 放射源在 ^{22}Na 能窗下测量基于 DRS4 评估板的正电子湮没测量系统的时间分辨率。

图 6 为内触发下基于 DRS4 的正电子湮没寿命测量系统测得源强与计数率关系。基于内触发的系统符合计数率随着源强的增强而增加，在源强为 24 μCi 时达到最大，其符合计数率为 353 cps。由于评估板的传输极限的限制和核信号具有随机的特性，导致基于内触发的系统单位时间内采集到的信号数量同样也会低于评估板的传输极限。在源强为 24 μCi 时，基于内触发的系统效率达到最大，其符合计数率为 353 cps。基于内触发的正电子湮没测量系统，通过评估板内部甄别电路，对有效事例进行甄别，然后触发采样电路对信号进行采样。但 DRS4 评估板不能精确的甄别有效信号，在测量过程中仍然存在少量无效事例触发 DRS4 芯片进行采样，所以才会导致内触发的系统的测量效率低于采用外部电路符合判选的系统。为了提高内触发下系统测量效率，精确的甄别有效信号是最关键的方法。可以优化 DRS4 评估板的甄别电路的方式，精确甄别每通道信号，实现核心信号高效利用，提高系统测量效率。结果表明：内触发方式的基于 DRS4 的正电子湮没寿命测量系统是可行的，能有效的提升了核心信号处理资源的利用率，但是需要对 DRS4 评估板内部甄别电路进行优化，对有效事例精确甄别，使系统达到最高测量效率。

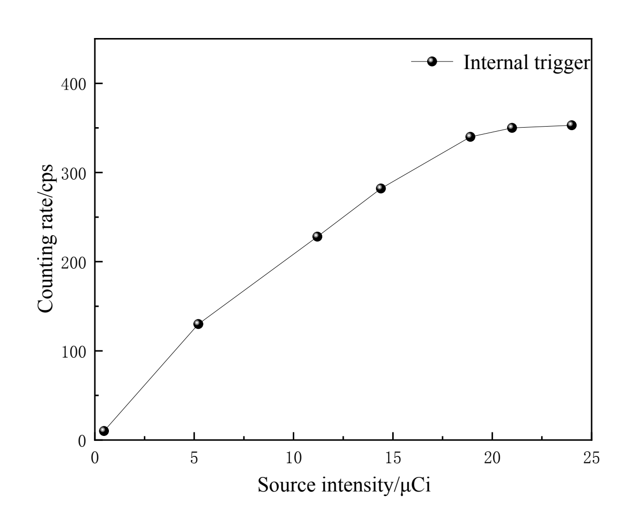


图 6 内触发下基于 DRS4 的正电子寿命测量系统符合计数率与源强关系

Fig.6 The relationship between the coincidence counting rate and source intensity in a positron lifetime measurement system based on DRS4 under internal triggering

利用 ^{60}Co 放射源在 ^{22}Na 能窗下测量对应的时间分辨。^{60}Co 放射源可同时放射出两种能量分别为 1.17 MeV γ光子和 1.33 MeV γ光子，在 ^{22}Na 能窗下得到时间分辨谱，以其半高

宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)作为时间分辨率参数。从图 7 可以看出，基于 DRS4 的正电子湮没测量系统时间分辨率为 186 ps，可满足正电子湮没测量的基本要求。

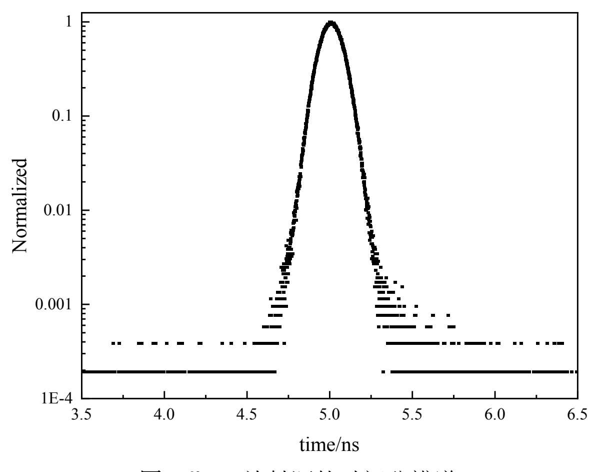


图 7 ^{60}Co 放射源的时间分辨谱

Fig.7 The timing spectrum of ^{60}Co source

3 结论

本文搭建了一套基于 DRS4 评估板的正电子湮没寿命测量系统，该测量系统的处理效率主要受 DRS4 评估板触发方式的限制，导致 DRS4 评估板无效事例触发采样，使其有效事例计数率低。针对基于 DRS4 评估板的正电子湮没测量效率低的问题，采用了符合判选的方法，甄别有效事例，避免 DRS4 评估板对无效事例的采样，使该测量系统的计数率达到基于 DRS4 评估板对核信号处理极限。通过有效事例符合判选的方法，提高了基于 DRS4 的正电子湮没寿命测量系统测量效率，为多通道数字化正电子湮没寿命测量系统的符合逻辑判选提供了解决方法。

4 参考文献

[1] 王胜, 杨静, 田丽霞, 等. 用正电子湮没谱学技术表征一种有机-无机杂化膜[J]. 核技术, 2015, 38(3): 030202.

[2] Eldrup M, Singh B N. Study of defect annealing behaviour in neutron irradiated Cu and Fe using positron annihilation and electrical conductivity[J]. Journal of Nuclear Materials, 2000, 276(1–3): 269−277.

[3] 韩振杰,刘福雁,张鹏,等.基于起始信号触发判选的正电子湮没寿命测量方法[J].核技术,2018,41(06):41-46.

[4] F. Bečvář, J. Čižek, L. Lešták, I. Novotny, I. Procházka, F. Šebesta, A high- resolution BaF2 positron-lifetime spectrometer and experience with its long-term exploitation, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 443 (2–3) (2000) 557–577.

[5] J. Nissilä, K. Rytsölä, R. Aavikko, A. Laakso, K. Saarinen, P. Hautojärvi, Performance analysis of a digital positron lifetime spectrometer, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 538 (1-3) (2005) 778-789.

[6] N. Djourelov, N. Charvin, C. Bas, J. Viret, V. Samoylenko, D. Sillou, Nucl. Instr. and Meth. B 264 (2007) 165.

[7] Bečvář, František et al. Performance of a High-Resolution Digital Positron-Lifetime Spectrometer[J], Acta Physica Polonica A 113 (2008): 1279-1284.

[8] Wang M, Bian Z , Wang Y ,et al. 2022. A 64-channel high-time resolution digital waveform sampling electronic system based on DRS4 for positron burst annihilation lifetime measurement [J]. Journal of instrumentation: an IOP and SISSA journal, 2022, 17(10), T10001.

[9] DRS4 Evaluation Board Rev. 5.1 manual: https://www.psi.ch/drs/DocumentationEN/manual_rev51.pdf

[10] AN Ran, CHEN Bin, LIU Yan-Fen, YE Bang-Jiao, KONG Wei, Stefan Ritt. A new positron annihilation lifetime spectrometer based on DRS4 waveform digitizing board[J]. Chinese Physics C, 2014, 38(5): 056001.

[11] M Petriska, S Sojak, V Slugeň. Positron lifetime setup based on DRS4 evaluation board[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2014, 505(1):012044.

[12] Martin Petriska, Stanislav Sojak, Vladimír Kršjak, Vladimír Slugeň; Digital triple coincidence positron lifetime setup with DRS4 and its benefits. AIP Conf. Proc. 2021, 2411 (1): 080009.

[13] Danny Petschke, Torsten E.M. Staab. DDRS4PALS: A software for the acquisition and simulation of lifetime spectra using the DRS4 evaluation board. SoftwareX. 2019, 10, 100261.